第 42 卷　第 1 期　　天 文 学 进 展　　Vol. 42,　No. 1
2024 年 3 月　　PROGRESS IN ASTRONOMY　　Mar., 2024

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.01.02

大麦哲伦云超泡 30 Doradus C 研究进展

陈晗晓[1]，池奕恒[1]，蒙怡帆[1]，陈　阳[1,2]，周　平[1,2]，孙　磊[1,2]，孙　玮[3,4]

(1.南京大学　天文与空间科学学院，南京　210023；　2. 南京大学　现代天文与天体物理重点实验室，南京　210023；　3. 中国科学院　紫金山天文台，南京　210008；　4.中国科学院　暗物质与空间科学重点实验室，南京　210008)

摘要： 超泡是由 OB 星协中大质量恒星星风或/及超新星爆炸驱动而产生的带壳层的巨型泡状星际介质结构，在多个波段都有明显的发射特征，是研究天体辐射机制的重要场所。30 Dor C 是大麦哲伦云中唯一已观测到明显非热辐射的超泡，非热辐射覆盖了整个超泡区域且在壳层处最显著，是大麦哲伦云中结构最大的非热辐射源。回顾与总结了截至目前天文学界对 30 Dor C 的研究成果，介绍了超泡内展源的基本情况，包括 X 射线热辐射、非热辐射以及其他波段的结果，同时对超泡内部已发现的点源信息做了整理，并讨论了超泡 30 Dor C 内粒子加速的证据、可能的粒子加速机制、超泡形成原因等热点问题。

关　键　词： 超泡；大麦哲伦云；星际介质

中图分类号： P145.3　　　　**文献标识码：** A

1　引　言

超泡是一种由星际介质 (interstellar medium, ISM) 组成的带壳层的大型泡状结构，直径通常在 100 ~ 1 000 pc[1]，壳层的内部充满了高温 (10^6 K) 的激波加热气体[2]。超泡由 OB 星协中的大质量恒星的恒星风以及/或者超新星爆炸驱动产生[3]，大质量恒星的强烈星风或超新星产生的激波会挤压其抛射物和环境中的星际介质，从而形成一个薄的、致密的、低温外壳。超新星的相关理论认为，当抛射物质与激波扫过环境物质的总量相当时激波开始衰减，由于超泡内 ISM 密度 (0.01 cm^{-3} 量级)[4]远低于外界环境 (1 cm^{-3} 量级)，粒子有效加速的时标长于孤立的超新星遗迹，同时由于大质量恒星星风和超新星均对超泡总能量存在贡献，超泡储存的能量比单一的超新星遗迹更大[1]，因此成为 TeV 甚至更高能量的高能宇

收稿日期： 2023-05-18；　**修回日期：** 2023-07-12

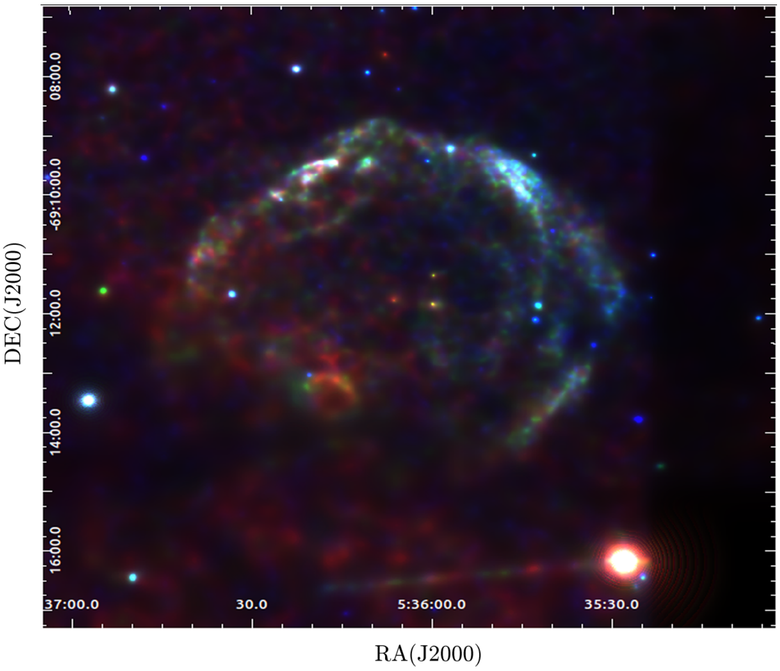
资助项目： 国家自然科学基金面上项目 (12273010)；国家自然科学基金创新群体项目 (12121003)；国家自然科学基金青年学生项目 (123B1021)

通讯作者： 陈阳，ygchen@nju.edu.cn

宙射线可能的起源场所[5, 6]。然而，在银河系内很难进行超泡的研究，因为超泡比一般超新星遗迹大，较大的视张角需要大视场的观测，且视线中有前景或后景天体的干扰，银道面较强的星际消光也会影响可见光、紫外线、X 射线等多个波段的观测。

大麦哲伦云 (Large Magellanic Cloud, LMC) 拥有良好的观测条件，其距离适中 (约 50 kpc)[7]，有着几乎是面向我们的低倾角 (约 35°)[8] 和低前景吸收 ($A_v < 0.3$ mag)[9]。此外，大麦哲伦云属于 SB(m) 型星系，提供了大量超新星遗迹、超泡、脉冲星风云等各种高能天体物理观测对象，因此，它是研究多种天体及其物理机制的理想场所。

30 Doradus C (简称 30 Dor C) (如图 1) 位于大麦哲伦云中 30 Dor 复合体西南部，距离大质量恒星形成区 R136 约 200 pc，其东部是超新星遗迹 N157B，西南方向是超新星遗迹 SN 1987A，南部为超新星遗迹蜂巢星云 (honeycomb nebula)。此外，30 Dor C 位置与大型 OB 星协 LH 90 (NGC 2044) 一致，LH 90 由许多星团组成，包含多颗沃尔夫-拉叶星[10]，因此 30 Dor C 可能就是由 LH 90 中的恒星风和超新星所产生[11]。1968 年，Le Marne 通过射电连续谱的观测发现 30 Dor C[12]，而 Mills 等人于 1984 年在 843 MHz 波段探测到壳的直径约 6′，在 LMC 约 50 kpc 的距离上对应于约 80 pc[13, 14]。Einstein 卫星首次观测到了 30 Dor C 的 X 射线辐射[15]，随后 ROSAT 观测到该超泡的壳状结构[16]。2000 年，XMM-Newton 的第一次成像就覆盖了 30 Dor C 区域，它的数据显示在热和非热 X 射线发射中也可以观测到类似的壳状结构[17]。



注：3 种颜色分别对应 3 个波段，其中红色为 0.5 ~ 1.2 keV，绿色为 1.2 ~ 2.0 keV，蓝色为 2.0 ~ 7.0 keV。

图 1　超泡的 Chandra 的 RGB 图像 (Chi 等人 2023，待投稿)

非热 X 射线辐射是搜寻宇宙射线加速地点最佳的证据。目前，在河内外极个别超泡中探测到了非热辐射，如河内的 RCW 38[18]、Westerlund 1[19]，大麦哲伦云中的 N 11[20]、N 51D[21]、30 Dor C[22–25]，以及 M33 中的 IC 131[26] (其中，N 11 和 N 51D 的非热辐射暂时存疑[27])。在本星系群的这些超泡中，30 Dor C 拥有最明亮的非热 X 射线和 TeV γ 射线辐射[28]，因此，对 30 Dor C 进行全面的观测和研究，将有助于我们探索超泡的物理属性以及粒子加速的机制。

在本文中，我们首先分别对 30 Dor C 的各波段弥漫辐射的情况和超泡内点源进行了综述，然后综述 30 Dor C 区域分子云的研究，最后对 30 Dor C 的研究进行了总结与展望。

2 辐射情况

对 30 Dor C 的辐射研究主要集中在 X 射线波段，且超泡的壳状结构在 X 射线上呈现区域性差异。Chandra X 射线天文台[22, 25, 30, 31]、XMM-Newton 望远镜[23, 25, 32]和 Suzaku[24]提供了关于 30 Dor C 丰富的 X 射线数据信息。除此之外，30 Dor C 在光学 (如 MCELS[33])、射电 (如 ALMA[28]) 和 γ 射线波段 (如 H.E.S.S[34]) 也有观测和研究。

2.1 X 射线热辐射

超泡是由大质量恒星星风以及核坍缩超新星爆炸共同作用而成，而大质量恒星尤其到演化后期如沃尔夫-拉叶星阶段的高速星风，以及超新星爆炸都会产生强激波和 X 射线辐射。这些 X 射线辐射根据其辐射机制不同，又可分为热辐射和非热辐射两大类。强激波震激超泡内物质时把气体加热到 $10^6 \sim 10^7$ K，足以辐射出 X 射线并伴随有 O、Ne、Mg 等中等质量元素类 He 和类 H 离子等发射谱线。沃尔夫-拉叶星星风中会富含 C、N 等元素，而超新星抛射物中会存在高丰度的中等质量元素，这些富金属的物质被激波加热后其 X 射线光谱中中等质量元素的发射线会异常强烈，可以用来推断超新星前身星的性质[29]。激波通过费米加速等加速机制加速相对论性电子，能量可达 10^{13} eV 以上，产生 X 射线同步加速辐射。同步加速辐射的光谱是一个简单的幂律谱，与热辐射产生的光谱相比有两个明显的区别：一是非热的幂律谱十分平滑，不存在任何发射线的特征；另一个是其流量随频率衰减较慢，通常谱较硬，一般在 2 keV 以上的能段占主导。通过这两个特点我们比较容易区分超泡中的 X 射线热辐射和非热辐射。

30 Dor C 整体由非热辐射占主导，热辐射主要出现在东部。Bamba 等人[30]在对超泡东部做光谱分析时，发现东北壳的光谱不同于超泡西壳的单一非热成分的谱型，其光谱表现更软，不能以单一模型拟合。整个超泡中，热辐射最强最明显的区域是超泡的东南部，Kavanagh 等人[25]证实了此处明亮的热辐射与一个超新星遗迹 MCSNR J0536-6913 有关，但没有发现有任何明显的与超新星遗迹相关的光学或射电辐射。由于在超泡壳层内没有观测到超新星爆炸与超泡的相互作用的痕迹，从 X 射线辐射上看，超新星遗迹北部的辐射更亮，表明此处的环境密度比南部更高，而超泡内部的低密度很难形成明亮致密的壳层结构，因此超新星遗迹被认为很可能位于超泡外部。该遗迹中有 O、Ne、Mg 和 Si 元素组成的抛射物，由抛射物丰度比值参考超新星爆炸模型，前身恒星可能质量为 18 $M_{\odot}$ 或者大于等于

40 $M_{\odot}$。根据此原始质量范围，该遗迹的年龄范围可能为 $(2.2 \sim 4.9) \times 10^3$ a。

热辐射是主要在东部区域探测到的现象，一个可能解释是那附近的超新星爆炸与壳壁发生作用，除此之外，较高的环境密度也可能造成这种现象，因为热辐射强度与密度的平方成正比。扣除超泡东南的超新星遗迹部分，在超泡东部仍然发现了热辐射的痕迹，O、Ne、Mg 元素超丰，这种现象暗示近期有核坍缩型超新星与超泡的壳发生相互作用[25]。此外，高金属丰度也会造成这个区域的 X 射线光度增强[35]。热等离子体的温度在区域之间有微小变化，总体在 $kT_e = 0.17 \sim 0.86$ keV 这一范围内。2002 年以来，陆续有人使用 Chandra、XMM-Newton、Suzaku、NuSTAR 等的观测数据在 30 Dor C 东部探测到热成分 (见表 1)，Babazaki 等人[32]对 30 Dor C 做了覆盖全区域的、以约 10 pc 为尺度的详细分析，其中在超泡东半区大多得到了热成分，而西半区则几乎未找到热成分。

表 1　30 Dor C 东部区域的热成分拟合结果

区域	kT_e/keV	参考文献
东壳	0.19(0.17~0.23)	[30]
东南壳	0.21(0.19~0.23)	[22]
东南壳	0.66(0.58~0.76)	[24]
东北壳	0.28(0.20~0.34)	
东北壳	0.31(0.28~0.34)	[25]
东南 (扣除 SNR)	0.40(0.37~0.46)	
南部	0.18(0.17~0.19)	
东北壳	0.86(0.85~0.87)	[4]

注：第二列中括号外数字表示最佳拟合值，括号内对应 90% 置信区间。

超泡西部区域由明亮的非热辐射主导。与此前的研究结果不同，Lopez 等人[4]发现在超泡的西南部需要一个温度 $kT = (0.86 \pm 0.01)$ keV 的热成分。Sasaki 等人[36]使用了最新的 eROSITA 数据对超泡西侧进行了谱拟合，给出了一个 $0.62(0.28 \sim 1.1)$ keV 的热成分，认为与 Lopez 的结果相符。但两个研究中所取的不是同一个区域，且背景选取也不同，因此对该西部热成分的结果仍然有待确认。

目前，其他区域暂未确切探测到热辐射。西北壳层检测不到热辐射的原因可能是由于前景中分子云吸收柱密度较高，且该区域的光谱中均以明亮的非热辐射主导，使得光谱中难以识别到热成分。在东北壳层的内侧，吸收比西北壳层少，Kavanagh 等人[25]认为此处可能有潜在的热成分。总之，目前 30 Dor C 内热成分的确定和参数限制还存在较大的争议，有待后续研究。

2.2　X 射线非热辐射

自 SN 1006 被发现壳层存在同步加速 X 射线[37]后，一些河内的超新星遗迹陆续被认为是高能宇宙射线的加速场所。而 30 Dor C 是第一个类 SN 1006 的河外源，其非热辐射的光度在发现时是所有已知存在同步加速辐射的源中最亮的[30]，非热成分的总光度约为 5.3×10^{28} J·s^{-1}[22]，这是第一次从超泡的外壳发现非热辐射。X 射线非热辐射不仅仅存在于壳层上，而是在整个超泡区域都有分布，这说明壳层明亮是一种投影效应。在整个壳层中，

西部的非热辐射整体比东部亮，西北壳是非热辐射最亮的区域。在过去 20 年内陆续有人对超泡的非热辐射情况做了研究，Bamba 等人[22]对超泡壳层的光谱拟合得到了很好的幂律谱，谱指数范围是 $2.1 \sim 2.9$；Kavanagh 等人[25]进行了覆盖超泡全区域的谱分析，幂律谱的谱指数范围是 $2.29 \sim 2.88$；随后 2019 的工作中部分区域拟合中为 $2.20 \sim 2.70$[31]；Babazaki 等人[32]对超泡进行了相当精细化的划分，最终的谱指数也基本落在 $2 \sim 3$ 之间。这些拟合结果都显示为典型的同步加速辐射。

超泡在 843 MHz 波段的射电壳与非热 X 射线分布高度相关[22]，非热 X 射线在射电亮处增强，说明非热 X 射线的辐射机制与射电波段是一致的，射电辐射存在偏振[25]，因此认为非热 X 射线很可能是来自于加速电子的同步辐射[22]。Nakamura 等人[38]讨论了超新星遗迹中作为半径的函数的非热成分随时间的演化，可以作为 Weaver 等人[39]所描述的超新星遗迹动力学年龄的指标。Babazaki 等人[32]以上述情况作为类比，研究了几个含有非热辐射的超泡的非热光度与超泡半径之间的关系，30 Dor C 位于峰值附近，即半径约 40 pc，表明 30 Dor C 处于高能粒子加速阶段，因此同步加速X射线是明亮的[32]。而这也意味着不同环境下，高能电子加速的持续时间可以远远超过之前在超新星遗迹情况下的共识 (约 10^3 a[40])。具有更长的电子加速的时间，以及如此大的非热辐射强度，可能原因是超泡在几百万年内有几次的超新星爆炸，为超泡持续提供了高能电子。

在有多个超新星在超泡内爆炸过的假设下，粒子加速在 30 Dor C 中的情况与在单一、孤立的超新星遗迹中是不同的。Parizot 等人[41]表明，OB 星协中的大质量恒星距离足够近，以至于它们的星风相互作用，产生强烈的湍流和磁流体力学 (magnetohydrodynamics, MHD) 波可以反复加速低能粒子。他们考虑了超泡内的多种作用机制，发现超泡通过反复加速可以产生能量高达约 10^{17} eV 的粒子。超泡的 $10\% \sim 30\%$ 的湍流能量可以转移到低能量的非热粒子中来加速它们[42]，而恒星风和超新星的能量有多达三分之一可以用于加速宇宙线[43]。Lopez 等人[4] 证明，来自恒星群的机械能和之前超泡内部的超新星爆炸足以解释观测到的非热辐射流量。

2.3 其他波段辐射情况

2.3.1 γ 射线波段的研究

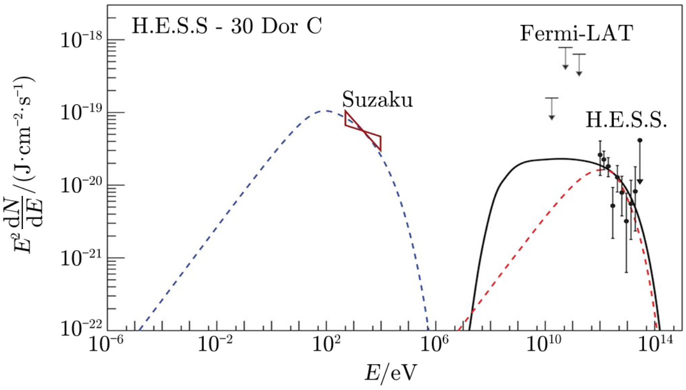
H.E.S.S 在 2015 年公布了对 30 Dor C 的 TeV γ 射线探测[34]。Fermi-LAT 后续的观测未确切探测到 30 Dor C 的延展 GeV γ 射线源[44]。在 $1 \sim 10$ TeV 范围内超泡 30 Dor C 的 γ 射线的能谱可以用幂律谱来描述，光度为 $(0.9 \pm 0.2) \times 10^{28}\ \mathrm{J \cdot s^{-1}}$[34]。$\gamma$ 射线发射的最佳拟合位置位于 6 个确定的子星团中[10, 34]。

γ 射线的探测结果显示，超泡内部的条件必须是极端的，TeV 发射可以用强子或轻子发射来解释。在强子情形下，强子宇宙线与背景等离子体碰撞产生中性 π_0 介子，进一步衰变成 γ 光子。基于 TeV 波段的光度，可以推算超泡内宇宙线质子总能量与物质密度关系为 $W_{\mathrm{pp}} = (0.1 \sim 25) \times 10^{45} (n_{\mathrm{H}}/1\ \mathrm{cm^{-3}})^{-1}$ J。由于超泡 30 Dor C 中大约爆炸过 5 个超新星[23]，超新星爆炸动能的宇宙线加速效率大约为 $5\% \sim 20\%$[45]，可能为宇宙线提供约 5×10^{43} J 能量，可以得到的平均气体密度 $n_{\mathrm{H}} \gtrsim 20\ \mathrm{cm^{-3}}$，而根据 X 射线热辐射估计得到的超泡西南的

气体密度 $n_{\rm H} \approx 0.1 \sim 0.4\,{\rm cm}^{-3}$，比前者的值低[34]。若 X 射线热辐射的半径小于致密外层的半径，或者冷却、致密的成团气体在超泡稀薄的内部能够存留下来，那么高密度的区域有可能存在。

对于轻子辐射的情形，γ 射线来自电子的轫致辐射和逆康普顿散射，该过程与 X 射线的同步辐射的产生来源于同一群电子。在这种情形下，宽波段能谱分布所需要的加速电子的能量约为 4×10^{41} J，平均磁场强度为 1.5×10^{-12} T，比绝大多数年轻的超新星遗迹里的低，但比大麦哲伦星云中的平均磁场强度高 $3 \sim 4$ 倍[34]。在高能量下，轫致辐射的贡献可以忽略不计[46]，而 X 射线是非热的，因此可以用高能电子向密集分子云及其增强磁场的传播来解释[47]。

图 2 显示了 30 Dor C 的能谱分布与强子和轻子模型，将 X 射线、GeV 和 TeV 观测相结合，使用 Fermi-LAT 光谱流量作为上限，讨论该 TeV 源的性质，其中轻子情形下辐射场的衍生磁场为 $(1.0 \sim 1.8) \times 10^{-12}$ T[34]。目前无法确认是强子还是轻子辐射，Kavanagh 等人[31]在 2019 年通过同步加速 X 射线壳估计了 30 Dor C 的激波下游磁场，发现下游磁场普遍低，大致为大于 2×10^{-12} T，根据这个结果，他们认为 TeV 辐射是由逆康普顿散射主导的，即轻子机制是 TeV γ 射线的主要来源。



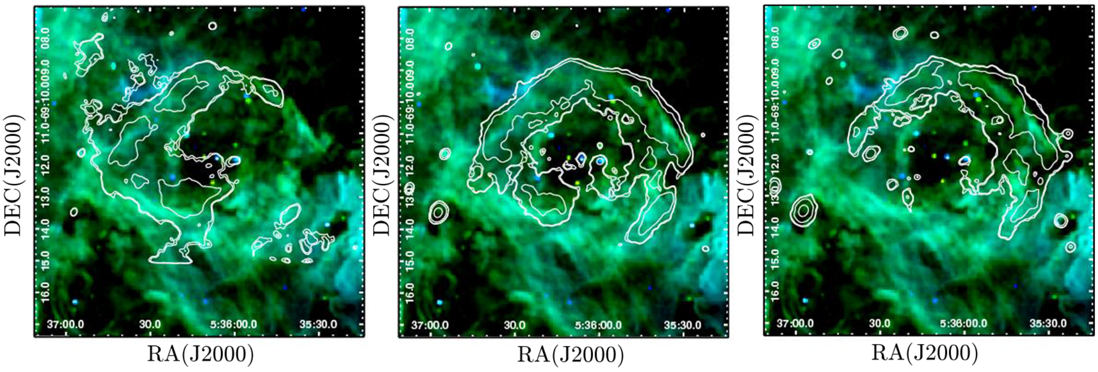
注：X 射线数据来自 Suzaku[24]，γ 射线数据来自 Fermi 和 H.E.S.S[34, 44]。虚线是轻子模型，实线是强子模型[34]。

图 2　30 Dor C 的能谱分布图

2.3.2　光学和射电波段的研究

30 Dor C 的外壳所发射的光学和射电辐射，可能是由 OB 星协 LH 90 (或 NGC 2044) 的星风和超新星爆炸产生的[11]，该星协中有 26 颗 O 型星和 7 颗沃尔夫-拉叶星，年龄在 3 ~ 7 Ma 左右[10]。从形态上看，30 Dor C 的 Hα 壳层是十分明确的，它限制了超泡东部的热辐射 (见图 3a))，并与非热 X 射线壳层有很好的相关性 (见图 3c))。20 cm 的射电辐射也与 Hα 壳层形态十分接近，这与标准超泡图像一致。

Mathewson 等人[48]对 30 Dor C 的光学辐射做了分析，使用的光学数据来源为 3.9 m 的英澳望远镜 (Anglo-Australian Telescope) 和光子计数成像系统 (image photon-counting system)。Hα 和 [S II] 图像显示出一个巨大的复杂丝状结构，形成一个与射电源共展的环形

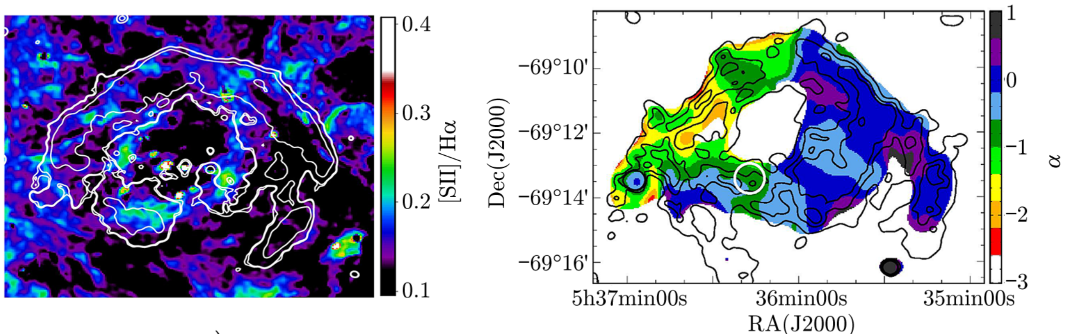


a) b) c)

注：a)、b)、c) 分别为 0.3 ～ 1 keV、1 ～ 2 keV、2 ～ 7 keV 的等值线，每种情况下的等值线等级是为了突出 X 射线的特征而任意选择的[25]。

图 3 30 Dor C **的** MCELS RGB **图** ([S II]、Hα、[O III])

结构，整体上超泡在光学波段显示为一个壳状源，形状为椭圆形，面积约 125 pc×100 pc，NGC 2044 也投影在壳层范围内，其中 3 个最亮的星团大致沿椭圆的长轴分布。他们分析了 [S II]/Hα 比率，发现这个比值在超泡周边小于 0.3，一般情况下，由于 [S II] 线对激波敏感，该比值大于 0.4 代表可能有超新星遗迹[49, 50]。Kavanagh 等人[25]引用 MCELS 的数据重新分析了光学波段的发射线，结果与 Mathewson 当年的一致 (如图 4a) 所示)[48]。在 30 Dor C 中，Hα 壳的膨胀速度约小于 100 km·s^{-1}[16, 31]，而在一般超新星遗迹中，相对论性电子被认为是通过扩散激波加速而加速的 (DSA)[51]，粒子需要速度约大于 1 000 km·s^{-1} 的激波来使能量达到 TeV。Kavanagh 等人[31]表明，激波在到达 Hα 壳层区域时停滞不前，并且通过其他的区域壳层间隙以更快速度膨胀。这一解释与超泡东北和西北区域发现的 Hα 和 X 射线的反相关性一致。



a) b)

注：a) 白线是超泡在 1 ～ 2 keV 的等值线，色阶表示 [S II]/Hα。b) 20 cm 的等值线被叠加在 1、3 和 5 mJy 的水平上。白色圆圈显示的是 SNR 的大致范围，右侧边栏量化了射电光谱的谱指数[25]。

图 4 a) 30 Dor C **的** MCELS [S II]/Hα **比值；**b) 36 cm **和** 20 cm **之间** 30 Dor C **的射电连续光谱**

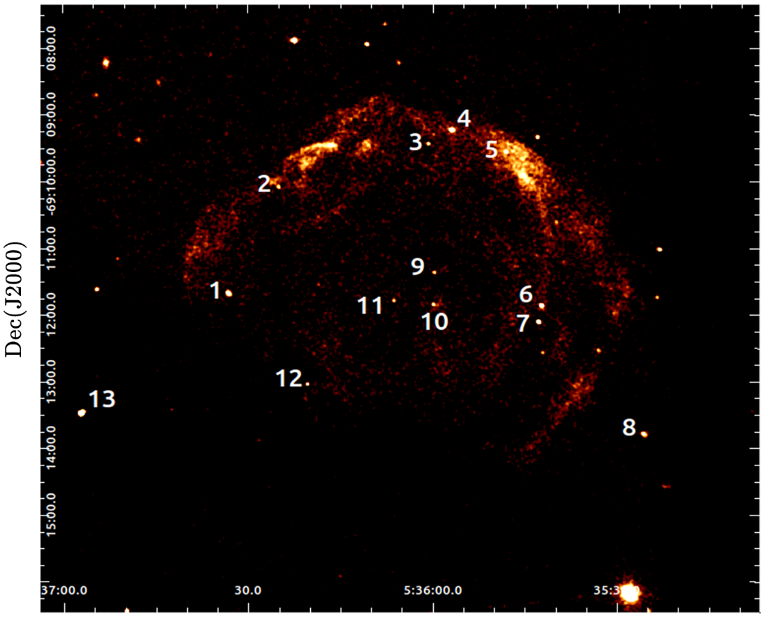
Mills 等人[13]在 1984 年开始使用 843 MHz 的 MOST 对大麦哲伦星云进行系统观测，

Mathewson 等人[48]对这些射电源进行了详细分析，其中包括 30 Dor C。相比于源的东部，西部的谱更平，这表明射电辐射在超泡的西侧为热源，而在东侧展示为热与非热并存。McGee 等人[52]的结果印证了这一结论，他们认为 Hα 线的强度是西部壳层连续谱的 5%，这清楚地表明了热辐射的来源。Kavanagh 等人[31]给出了明确的超泡东西部射电辐射差异的分析 (见图 4b))，其中西部壳层的谱 (指数 $0.5 \gtrsim \alpha \gtrsim -0.5$) 十分平坦，他们将这种谱指数解释为 30 Dor C 西部的前景分子云的污染；东部壳层的谱 (指数 $-0.6 \gtrsim \alpha \gtrsim -2.2$) 更加陡峭。虽然 [S II]/H$\alpha$ 的比值只有 0.3，但是光学和射电辐射的情况都表明有超新星遗迹存在，而在后续也确实证实在超泡东南存在一个超新星遗迹[25]。

3　点　源

在不同波段的图像中，30 Dor C 都显示出明显的多点源特征，对点源性质及其形成的探讨有助于研究超泡各物理性质。目前 30 Dor C 中已有 13 个点源被相关研究提到。

Lortet 和 Testor[53]1984 年对 30 Dor C 在光学波段进行研究，并在红外波段进行对比，认证了在明亮中心的 3 个明显点源 (图 5 中源 6、10、11)；源 6 的光谱显示其包括一颗红巨星和沃尔夫-拉叶星；源 10 中最亮的恒星是 Brey 65，Moffat[54]在 1989 年指出其光谱类型为 WN7。Testor 等人[10]1993 年再次对该区域 LH 90 星团中两个紧密星团 (源 6 和 10) 进行了观测分析，指出源 6 所代表的星团中包含的红超巨星光度与位于同一星团中的沃尔夫–拉叶星 Brey 58 和 TSWR 4 相当，并指出 BAT99 80 可能是源 10 的光学对应体。



注：30 Dor C 的图像为 Chandra 在 0.5 ～ 7 keV 的成像。

图 5　30 Dor C 区域的点源

Bamba 等人[22]在 2004 年利用 Chandra X 射线天文台和 XMM-Newton 望远镜对 30 Dor C 进行了硬 X 射线光谱分析。在点源分析中，利用 Chandra 的高角分辨率，他们认证了 6 个点源，指出源 6 是其中最亮点源，光谱符合约 2.1 keV 的薄热等离子体模型，与来自大质量恒星的 X 射线光谱一致，最可能与 MG 41 和 Brey 58 有关；源 10 的最佳拟合的谱指数约为 2，结合光度与光谱分析，可能是活跃星团中超新星爆炸留下的致密星；源 11 包括一颗 OB 星，其光谱较软，符合热等离子体模型，与源 6 类似；另 3 个源 (1、7、12) 的光谱较硬，在光学波段和 SIMBAD 中并未找到对应体，基于光谱，认为可能是背景 AGN 或超新星爆炸的致密残骸 (如黑洞和中子星)。

Kanavagh 等人[31]在 2019 年对 Chandra X 射线天文台的数据进行处理，在 0.5 ~ 0.8 keV 图像上得到 10 个点源 (图 5 中源 1—7, 9—11)。Lopez 团队[4] 在 2020 年将 NuSTAR X 射线望远镜的 3 ~ 20 keV 的图像与 30 Dor C 在 0.5 ~ 7.0 keV 的 Chandra X 射线天文台图像进行对比，标出 9 个点源 (图 5 中源 1、6、7、8、9—13)；根据 Lin 等人[55]在 2012 年的分类，源 13 被确定为候选致密天体双星；在 Chandra X 射线天文台图像中位于中心的 3 个点源 (源 9—11) 在 NuSTAR X 射线望远镜中并未被探测到。

4 高能辐射与星际气体

30 Dor C 被认为是激波与周围介质相互作用的场所，与它相关的气体分子云已被发现。激波与周围星际气体的相互作用，即所谓的“激波-云相互作用”，是产生河内超新星遗迹内部宇宙线加速以及高能辐射起源的重要机制。激波-云相互作用增强了气体云周围的湍流和磁场，在边缘产生了明亮的同步加速 X 射线和具有高滚降能量的宇宙线电子[56–58]。此外，周围的星际气体成为宇宙线质子通过中性介子衰变产生 γ 射线的靶标[59–62]。

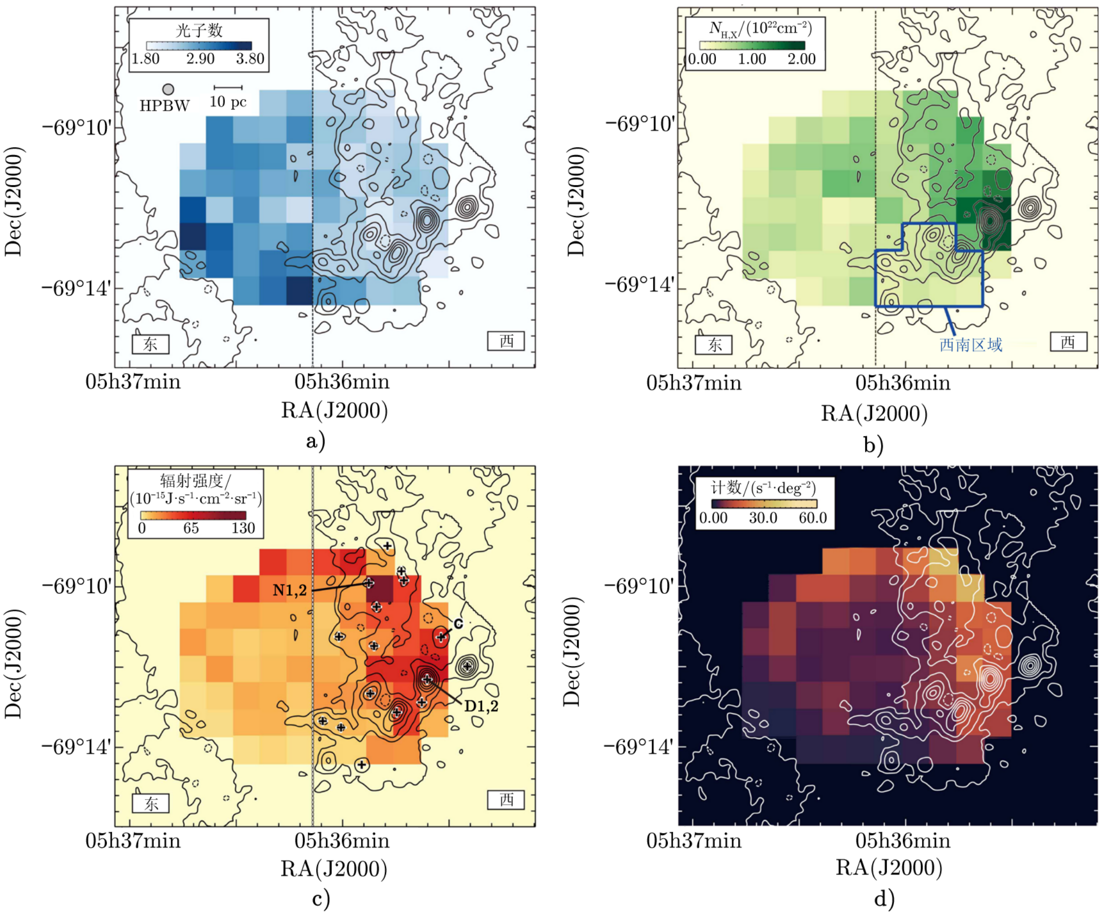
Sano 等人[46]分别使用了 Mopra 22 m 射电望远镜得到的 ^{12}CO(J = 1—0) 和 ATCA 和 Parkes HI 数据，确认了与 30 Dor C 相关的分子和原子气体。在超泡中，非热射线峰与分子云有较好的空间对应关系，根据他们的结论，大部分的分子云分布在超泡的西壳，此处的 CO 辐射峰与同步加速 X 射线峰之间的空间分离约为 10 pc。他们认为，该空间上的分离不是分子的吸收造成的，可以解释为密集的云周围的磁场通过激波-分子云相互作用放大[63, 64]。Yamane 等人[28]通过 ALMA 的 ^{12}CO(J = 1—0)、ASTE 的 ^{12}CO(J = 3—2) 以及 ATCA 的 HI 谱线观测得到了分辨率更高的结果，其中 CO 云有 23 块，半径在 3 ~ 6 pc 之间。他们整合了 CO 和 HI 的数据，得到总的质子柱密度 $N_{\rm p}({\rm H_2{+}HI})$ (见图 6)，计算方式为[28, 65]：

$$N_{\rm p}({\rm H_2 + HI}) = 2N_{\rm p}({\rm H_2}) + N_{\rm p}({\rm HI}) \quad , \tag{1}$$

$$N_{\rm p}({\rm H_2}) = 7.0 \times 10^{20} W({\rm CO}) \quad , \tag{2}$$

$$N_{\rm p}({\rm HI}) = 1.823 \times 10^{18} W({\rm HI}) \cdot X \quad , \tag{3}$$

其中，$N_{\rm p}({\rm H_2})$ 为分子柱密度，$N_{\rm p}({\rm HI})$ 为中性氢柱密度，单位都为 ${\rm cm^{-2}}$，$W({\rm CO})$ 与 $W({\rm HI})$ 分别为 CO 和 HI 的积分强度，X 为比例因子。



注：图中的等值线为 $N_p(H_2 + HI)$，等值线的等级分别为 0.53×10^{22}，0.79×10^{22}，1.27×10^{22}，2.61×10^{22}，3.44×10^{22}，4.35×10^{22}，5.35×10^{22} cm^{-2}。

图 6　a) X 射线谱指数；b) 吸收柱密度 $N_{H,X}$；c) 吸收校正后的同步 X 射线辐射强；d) 平均硬 X 射线光子数[28]

将原子和分子云的空间分布与 X 射线辐射进行比对发现，X 射线热辐射更亮的超泡东部没有 CO/HI 云，西部存在 CO/HI 云，但无证据显示有热辐射[46]。与热辐射相反的是，分子云周围的非热 X 射线辐射在 pc 尺度上明显增强，即分子/原子云与同步 X 射线辐射为正相关[46]。Yamane 等人[28]将 ISM 的分布与 Babazaki 等人[32]得到的超泡区域 X 射线谱指数、吸收柱密度和同步加速 X 射线强度的空间分布进行了对比 (见图 6)，发现在总质子柱密度 $N_p(H_2+HI)$ 大的地方，X 射线更强，X 射线谱指数更小，而散射更大，这也符合激波-分子云相互作用产生更高能宇宙线电子的解释。X 射线谱指数在大质量星团中心整体呈变小的趋势，这表明大质量星团通过超新星产生宇宙线电子，因此超泡内部可能爆炸过一个或多个超新星[28]。

5 总结与展望

本文讨论了超泡 30 Dor C 在各个波段的辐射情况，包括 X 射线、光学、射电、γ 射线等，以及超泡区域的点源和分子云的研究。

在 30 Dor C 中，X 射线非热辐射覆盖全区域，而热辐射主要分布在超泡的东部区域，热成分的拟合结果主要在 0.2 $\sim$ 0.9 keV 之间，其中，Kavanagh 等人发现东南部的热辐射主要来源于一个位于超泡外部的超新星遗迹 MCSNR J0536-6913。此外，Lopez 等人和 Sasaki 等人都在超泡的西部发现热辐射的踪迹，但此前其余的研究都未提到，对于超泡西部热辐射的搜寻值得后续继续研究。然而由于前景的吸收，现有的数据还无法很好地限制热成分参数。

30 Dor C 中的非热 X 射线辐射来源于相对论性的高能粒子加速产生的同步辐射，非热 X 射线辐射壳层与 Hα 壳和射电壳层都有较好的相关性。γ 射线的数据发现了 30 Dor C 存在 TeV 的辐射，符合幂律谱模型，TeV 辐射可以用强子和轻子两种模型来解释，目前还无法认定为哪一种情况，Kavanagh 等人认为有可能是轻子主导的辐射。

Yamane 等人认为同步加速 X 射线是由于壳层西部丰富的星际介质发生了激波-云相互作用，放大了激波下游的磁场。过往的结果都显示了超泡内部发生过不止一次超新星爆炸，为超泡提供了巨大的能量，使得电子能够被加速到 TeV 的能量。

前人对 30 Dor C 的研究是随着观测设备的发展而进展的，自从其被 ROSAT 望远镜发现后，最主要的X射线数据来源于 Chandra X 射线天文台和 XMM-Newton 望远镜。由于 30 Dor C 有很强的非热辐射这一特殊性，专用于硬 X 射线研究的 NuSTAR 望远镜已对其进行过多次观测，而在逐渐兴起的 X 射线偏振研究中 (如 IXPE、eXTP 等)，30 Dor C 将因其重要性而成为一个可能的研究对象，有望揭开其非热辐射的本质和宇宙线加速的机制。在未来 10 年中，随着 X 射线天文学进入高光谱分辨率时代 (XRISM、HUBS、Athena、Lynx 等)，对 30 Dor C 的热辐射成分也将会有深入的研究，这将对大质量恒星星风-超新星激波间相互作用提供研究素材。总之，在未来，天文技术的发展将会使我们对 30 Dor C 这一奇特天体有更深层次的认知。

参考文献：

[1] Kavanagh P J. Ap&SS, 2020, 365(1): 6
[2] Mac Low M M, McCray R. ApJ, 1988, 324: 776
[3] Bruhweiler F C, Gull T R, Kafatos M, et al. ApJ, 1980, 238: L27
[4] Lopez L A, Grefenstette B W, Auchettl K, et al. ApJ, 2020, 893: 144
[5] Bykov A M, Fleishman G D. MNRAS, 1992, 255: 269
[6] Klepach E G, Ptuskin V S, Zirakashvili V N. Astroparticle Physics, 2000, 13: 161
[7] Feast M. PASP, 1999, 111: 775
[8] van der Marel R P, Cioni M-R L. AJ, 2001, 122: 1807

[9] Bessell M S. A&A, 1991, 242: L17
[10] Testor G, Schild H, Lortet M C. A&A, 1993, 280: 426
[11] Lucke P B, Hodge P W. AJ, 1970, 75: 171
[12] Le Marne A E. MNRAS, 1968, 139: 461
[13] Mills B Y, Turtle A J, Little A G, et al. Australian Journal of Physics, 1984, 37: 321
[14] Pietrzyński G, Graczyk D, Gieren W, et al. Nature, 2013, 495: 76
[15] Long K S, Helfand D J, Grabelsky D A. ApJ, 1981, 248: 925
[16] Dunne B C, Points S D, Chu Y-H. ApJS, 2001, 136: 119
[17] Dennerl K, Haberl F, Aschenbach B, et al. A&A, 2001, 365: L202
[18] Wolk S J, Bourke T L, Smith R K, et al. ApJ, 2002, 580: L161
[19] Muno M P, Law C, Clark J S, et al. ApJ, 2006, 650(1): 203
[20] Maddox L A, Williams R M, Dunne B C, et al. ApJ, 2009, 699: 911
[21] Cooper R L, Guerrero M A, Chu Y-H, et al. ApJ, 2004, 605: 751
[22] Bamba A, Ueno M, Nakajima H, et al. ApJ, 2004, 602: 257
[23] Smith D A, Wang Q D. ApJ, 2004, 611: 881
[24] Yamaguchi H, Bamba A, Koyama K. PASJ, 2009, 61: S175
[25] Kavanagh P J, Sasaki M, Bozzetto L M, et al. A&A, 2015, 573: A73
[26] Tüllmann R, Long K S, Pannuti T G, et al. ApJ, 2009, 707: 1361
[27] Yamaguchi H, Sawada M, Bamba A. ApJ, 2010, 715: 412
[28] Yamane Y, Sano H, Filipović M D, et al. ApJ, 2021, 918: 36
[29] Sukhbold T, Ertl T, Woosley S E, et al. ApJ, 2016, 821: 38
[30] Bamba A, Ueno M, Koyama K, et al. 8th Asian-Pacific Regional Meeting, Volume II, Tokyo: ASJ, 2002: 129
[31] Kavanagh P J, Vink J, Sasaki M, et al. A&A, 2019, 621: A138
[32] Babazaki Y, Mitsuishi I, Matsumoto H, et al. ApJ, 2018, 864: 12
[33] Smith R C, Points S D, Chu Y H, et al. American Astronomical Society Meeting Abstracts, Volume 207, Washington DC: AAS, 2005: 145.01
[34] H E S S Collaboration, Abramowski A, Aharonian F, et al. Science, 2015, 347: 406
[35] Silich S A, Tenorio-Tagle G, Terlevich R, et al. MNRAS, 2001, 324: 191
[36] Sasaki M, Knies J, Haberl F, et al. A&A, 2022, 661: A37
[37] Koyama K, Petre R, Gotthelf E V, et al. Nature, 1995, 378: 255
[38] Nakamura R, Bamba A, Dotani T, et al. ApJ, 2012, 746: 134
[39] Weaver R, McCray R, Castor J, et al. ApJ, 1977, 218: 377
[40] Reynolds S P, Keohane J W. ApJ, 1999, 525: 368
[41] Parizot E, Marcowith A, van der Swaluw E, et al. A&A, 2004, 424: 747
[42] Bykov A M, Toptygin I N. Astronomy Letters, 2001, 27: 625
[43] Butt Y M, Bykov A M. ApJ, 2008, 677: L21
[44] Ackermann M, Albert A, Atwood W B, et al. A&A, 2016, 586: A71
[45] Vink J, eds. Physics and Evolution of Supernova Remnants. Switzerland AG: Astronomy Astrophysics Library, 2020: 521
[46] Sano H, Sato J, Horachi H, et al. ApJ, 2017, 843: 61
[47] Crutcher R M, Wandelt B, Heiles C, et al. ApJ, 2010, 725: 466
[48] Mathewson D S, Ford V L, Tuohy I R. ApJS, 1985, 58: 197
[49] Mathewson D S, Clarke J N. ApJ, 1973, 179: 89
[50] Fesen R A, Blair W P, Kirshner R P. ApJ, 1985, 292: 29
[51] Bell A R. MNRAS, 2004, 353: 550
[52] McGee R X, Lynette Newton M, Brooks J W. Australian Journal of Physics, 1974, 27: 729
[53] Lortet M C, Testor G. Journal des Astronomes Francais, 1984, 20: 20
[54] Moffat A F J. ApJ, 1989, 347: 373

[55] Lin D, Webb N A, Barret D. ApJ, 2012, 756: 27
[56] Sano H, Sato J, Horachi H, et al. ApJ, 2010, 724: 59
[57] Sano H, Tanaka T, Torii K, et al. ApJ, 2013, 778: 59
[58] Sano H, Fukuda T, Yoshiike S, et al. ApJ, 2015, 799: 175
[59] Fukui Y, Sano H, Sato J, et al. ApJ, 2012, 746: 82
[60] Fukui Y. in: Torres D F, Reimer O, eds, Astrophysics and Space Science Proceedings Vol 34, Cosmic Rays, Cham: Springer, 2013: 249
[61] Yoshiike S, Fukuda T, Sano H, et al. ApJ, 2013, 768: 179
[62] Fukuda T, Yoshiike S, Sano H, et al. ApJ, 2014, 788: 94
[63] Inoue T, Yamazaki R, Inutsuka S-i. ApJ, 2009, 695: 825
[64] Inoue T, Yamazaki R, Inutsuka S-i, et al. ApJ, 2012, 744: 71
[65] Fukui Y, Kawamura A, Minamidani T, et al. ApJS, 2008, 178: 56

Current Investigation on Superbubble 30 Doradus C in the Large Magellanic Cloud

CHEN Han-xiao[1], CHI Yi-heng[1], MENG Yi-fan[1],
CHEN Yang[1,2], ZHOU Ping[1,2], SUN Lei[1,2], SUN Wei[3,4]

(1. School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of Modern Astronomy and Astrophysics, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 4. Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Superbubbles are large shell-like interstellar medium structures formed by stellar winds from massive stars and supernovae. With obvious emission signatures in multiple wavelengths, superbubbles are important sites for studying the radiation mechanisms. 30 Doradus C (30 Dor C in short) is located southwest of 30 Dor in the Large Magellanic Cloud. Its location is basically consistent with OB association LH 90, suggesting that this superbubble may have been created by it. Since 30 Dor C was detected in X-ray band by Einstein satellite in 1981, its X-ray emission has been observed and studied for many years. 30 Dor C is the only superbubble dominated by non-thermal emission in the Large Magellanic Cloud and it's also the largest non-thermal X-ray emission source in the Local Group. The non-thermal emission covers the entire region of the superbubble and is most significant at the shell. Such bright non-thermal emission may due to particle acceleration in the superbubble, and to find out the evidence, the magnetic field conditions in the superbubble and radiation in other bands have also been studied. Compared to non-thermal emission, thermal emission in 30 Dor C is relatively faint. Most of the thermal emission is detected in the eastern region of 30 Dor C, and there are also a supernova remnant found outside the superbubble at the

southeast of the shell. In recent years, with the advancement of radio observation, the study of molecular clouds of 30 Dor C has also increased. This paper reviews and summarizes the research of 30 Dor C up to now. The basic situation of thermal emission, non-thermal emission and other bands are discussed first. Meanwhile, a summary is provided on the point sources discovered inside the superbubble. The evidence of particle acceleration inside 30 Dor C is discussed according to the radiation situation, as well as current particle acceleration models and the formation reasons of 30 Dor C.

Key words: superbubble; Large Magellanic Cloud; ISM